第 37 卷第 24 期 生 态 学 报 Vol.37,No.24
2017 年 12 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Dec.,2017

DOI: 10.5846/stxb201705190925
孙然好, 程先, 陈利顶.基于陆地-水生态系统耦合的海河流域水生态功能分区.生态学报,2017,37(24):8445-8455.
Sun R H, Cheng X, Chen L D.Coupling terrestrial and aquatic ecosystems to regionalize eco-regions in the Haihe River Basin, China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(24):8445-8455.

基于陆地-水生态系统耦合的海河流域水生态功能分区

孙然好[1], 程　先[1,2], 陈利顶[1,*]
1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京　100085
2 中国科学院大学,北京　100049

摘要:水生态功能分区是针对水生态系统特征的陆地生态系统划分,是为流域水生态管理提供生态背景和基本单元。陆地-水生态系统的耦合是水生态功能分区的核心,但多停留在个别小流域进行理论探讨,大型流域的实际案例较少。针对海河流域独特的气候、地貌、水文和人类活动特征,提出了水生态功能分区的三级指标体系。一级二级区针对气候、地貌、水文背景进行"自上而下"的分区,三级区针对人类活动对水资源、水环境、生境影响,采用"自下而上"的分区方法。最终,海河流域划分了 6 个一级区、16 个二级区和 73 个三级区。研究充分体现了"以水定陆、以陆控水"的基本原则,以及"自下而上"和"自上而下"分区方法的优点,结果可为海河流域水生态管理提供科学依据,为水资源空间调配与合理利用、产业结构布局与区域协调等服务。
关键词:生态功能;生态服务;功能分区;水质;海河

Coupling terrestrial and aquatic ecosystems to regionalize eco-regions in the Haihe River Basin, China

SUN Ranhao[1], CHENG Xian[1,2], CHEN Liding[1,*]
1 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: It is important to assess the aquatic ecosystem in large-scale basins when considering complicated influential factors of anthropogenic activities on these ecosystems. Watershed management needs more information on ecological function and services in large regions. Spatial units are particularly important for the watershed management. Eco-regions are effective solutions to integrate the terrestrial and aquatic ecosystems. Many studies have been focused on several local watersheds. However, few studies have been implemented on the correlations between the terrestrial and aquatic ecosystems in large-scale watersheds. For a case study, we selected the Haihe River Basin to investigate the methods and indicators of the aquatic eco-regions. This study was conducted to assess the river ecosystem in the Haihe River Basin by sampling 249 river sites during the pre- and post-rainy seasons from 2013 to 2015. Water sampling and sample preservation were conducted in accordance with Chinese national experimental standards. Macroinvertebrates were collected from each sampling site at the same time as water sampling. The sampling method for macroinvertebrates was based on rapid bioassessment protocols. After identifying the spatial characteristics of terrestrial and fluvial landscapes, we proposed some guidelines and criteria for regionalizing the terrestrial and aquatic ecosystems in the Haihe River Basin. Three levels of eco-regions were used to

基金项目:科技部国家重点研发计划项目(2016YFC0503001);国家重点实验室自主项目(SKLURE2017-1-3)
收稿日期:2017-05-19;　**修订日期:**2017-11-07
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liding@ rcees.ac.cn

differentiate the terrestrial and aquatic ecosystems. The first and second levels of eco-regions were identified using "top-down" methods. The regionalization indicators included climate, topography, vegetation, and soil. Six first-level and 16 second-level eco-regions were regionalized in this region. These eco-regions could be used to guide land use planning and ecological management. The third-level eco-regions were identified using "bottom-up" methods. The regionalization indicators included water consumption of production and living, pollutant discharge, watershed geometry, landscape pattern, land use, and river types. The resulting 73 eco-regions were obtained by coupling the administrative boundaries and second-level eco-regions. Finally, the eco-regions were evaluated by field survey data including water quality, aquatic vegetation, and aquatic communities. The significance level of the correlations exhibited the influence of terrestrial indicators on the aquatic ecosystem. The third-level eco-regions can be used to direct the land use planning for specific socioeconomic activities, water resources, and pollutant loads. These eco-regions identify priority areas for ecological restoration and aquatic life protection. This study shows how different data sets can be used to regionalize eco-regions and what specific factors should be included in the indicator system. The results can potentially be used to improve the ecological management in the Haihe River Basin and can be useful to regionalize the ecosystems in other large watersheds.

Key Words: ecological function; ecosystem services; regionalization; water quality; Haihe River

对水生态功能进行辨识和分区是进行流域生态管理的科学基础和重要依据[1-2]。目前国内水生态功能分区/区划存在以下问题:(1)多定性考虑不同要素间的相互关系,对于生态系统之间的功能联系考虑的不足;(2)多考虑人类活动和社会经济发展对水资源的需求,未充分考虑生物、陆地生态系统对水环境的需求及两者关系;(3)多以水体现状使用功能进行划分,缺乏对水生态系统完整性和区域分异性的考虑。造成这种状况的主要原因是:污染控制未能体现"分区、分类、分级、分期"的水环境管理理念,对流域整体的系统性认识不足。"水生态功能分区"正是在上述背景下提出来的,基于流域水生态系统的特点,以流域内不同尺度的水生态系统及其影响因素为研究对象,探讨水生态保护目标及其实现途径,从而为地表水质控制单元划分、区域土地利用结构调整和产业结构调整提供科学依据。

国际上对流域水生态功能进行分区和管理有许多成功案例,比如美国的田纳西流域、切萨皮克流域、澳大利亚的墨累-达令流域等。美国的水环境生态分区,主要按照土地利用、地貌类型、潜在植被和土壤类型进行四级划分[3-5]。欧盟的水环境生态分区,也主要基于地形、生物、生态要素的异质性特征,"从上到下"按等级框架研究水生态系统[6]。澳大利亚的水环境生态分区,综合考虑了气候(周期变化和降雨量)、地理(海拔和地形)和植被(结构和组成)因子对水生态系统的影响。从国外水生态功能分区研究可以看出,流域水生态功能分区需要综合考虑陆地生态系统特征和水生态系统特征,根据水生态系统的潜在影响来"以水定陆"、以陆地生态系统为管理单元进行"以陆控水"。

国内比如辽河流域进行的多级分区[7-9],其它重要流域也进行了探索性工作[10-15]。自"十一五"以来,国家水体污染控制与治理科技重大专项专门开展了对重点流域的水生态功能分区研究,包括辽河、松花江、淮河、海河、东江、黑河、太湖、巢湖、滇池、洱海等,多数流域侧重于一级二级区的研究[16-18]。"十二五"期间部分流域继续开展了相关研究,完成了三级分区[19-22]。海河流域处于我国社会经济高度发达的地区,生态环境与经济发展的矛盾日益突出,而长期以来缺乏对该区域水生态系统结构和功能的系统调查和特征分析。因此,迫切需要对海河流域水生态功能进行分区定位,全面系统认识海河流域水生态系统结构和功能。此外,海河流域作为我国半湿润地区的典型流域,具有代表性的气候和地形特点,水生态功能分区研究不仅能够为区域水资源管理和生态安全构建提供支持,同时也可以为类似流域的水环境管理提供参考。

1 研究区概况与分区基础

1.1 研究区概况

海河流域包括海河干流、滦河和徒骇马颊河 3 大水系、7 大河系、10 条骨干河流,面积约 32 万 km^2。海河

流域山地和平原面积分别占 60%和 40%,太行山、燕山以西、以北分布面积较广的黄土高原,平原大致可分为山前洪冲积平原、中部河流泛滥平原和滨海平原。海河流域从东到西地带性植被依次为森林、灌丛、稀疏灌草丛等。流域西北部多为钙层土,中北部淋溶土、半淋溶土,中南部半淋溶土、初育土,中东部水成土、半水城土,东部沿海盐碱土。海河流域年均降水量的 80%集中在汛期,降水量由东南向西北逐渐减少。多年平均水资源总量 3.7×10^{10} m^3,流域水资源开发利用率达到了 98%,耗水率达 70%。近年来,在各级支流近 10000 km 河长中,已有 4000 km 河道长年干涸,主要河道中下游年均断流达 300 天左右。海河流域平均人口密度为 371 人/km,为全国平均人口密度的 3.47 倍。作为全国主要粮食产区之一,共有耕地 1.09×10^5 km^2,约占全国的 11%。流域属于典型的资源性缺水地区,目前以不足全国 1.3%的水资源量,承担着 10%的人口和 13%的 GDP。

1.2　水生态功能一级二级区

海河流域在“十一五”期间完成了水生态功能一级二级分区[23-24],本文主要探讨三级分区。在前期研究中,选择地貌、气候、水文作为一级分区因子,植被、土壤作为二级分区因子,然后结合流域特点,筛选出针对性的指标体系。根据地貌类型、干燥度和径流深的空间异质性特征,利用插值方法分别绘制出 3 个指标因子的分级图,得到矢量分区图,叠置形成一级区图。然后,对土壤类型和植被覆盖类型进行空间聚类,根据聚类结果分别绘制出这 2 个指标因子的矢量图。对这 2 个矢量图和一级分区矢量图进行叠置,确立二级分区图。最终,共划分了 6 个一级区、16 个二级区(图 1)。

1.3　三级区数据收集和处理

三级分区以小流域为基本单元,利用 1:5 万 DEM 和 SWAT 模型提取子流域。利用已有河网数据作为基准,在平原地区对 1:5 万 DEM 进行填洼等前处理,提取更加详细的河网和小流域,最后得到小流域 2957 个,平均流域面积 105 km^2,计算各个小流域的累积汇水栅格、流向图、水系级别等信息。

社会经济统计数据来自于流域 8 个省市 2010 年的统计年鉴,土地利用来自于 2010 年的 1:10 万土地利用图。社会经济数据多基于县级行政单元,而三级分区是基于小流域集水单元进行划分。我们采取了基于土地利用赋权的方法[25],比如农业用水和化肥使用更多集中在农田,工业用水和污水排放则集中于城镇用地,牲畜饲养则更多在农村用地。通过在不同土地利用斑块的社会经济指标赋权后,可以得到各个小流域的社会经济数据。相比单纯基于流域面积权重的社会经济指标空间化,本研究使用的方法更能体现社会经济活动的主要成因和途径,具有更高的精度。

为充分了解流域水生态系统特征,共设置了 249 个采样点(图 2),主要监测水质、底栖动物、藻类和鱼类特征。采样点的布设主要在干流和较大支流的上、中、下游各设 1 个点,在 2013—2015 年每年的雨季前后两次采样。水质数据采用多参数水质仪(YSI 6600V2, YSI 公司, 美国)现场测定 pH 值、水温、溶解氧、混浊度、电导率等,将水样用车载冰箱带回野外实验室后,用紫外分光光度计(PhotoLab S12, WTW 公司,德国)分析 TN、NH_3-N、NO_3-N、TP、COD。底栖生物、藻类的采样时间、地点与水体采样保持一致,带回实验室进行种类鉴定。鱼类调查困难较大,采用挂网、电鱼等多种方式,只在 52 个点位捕获鱼类。

生物多样性 Shannon-Wiener 指数(H')[26]

$$H' = -\sum_{i=1}^{s} \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N} \tag{1}$$

式中, n_i为第 i 种(或属)藻类的细胞密度(底栖动物、鱼类生物量);N 为采样点 1 L 水样中藻类总细胞密度(底栖动物、鱼类总生物量);S 为物种(或属)数。

Berger-Parker 优势度指数(B-P)[27-28]

$$B - P = \frac{N_{max}}{N} \tag{2}$$

式中,N_{max}为最富集类群的藻类细胞密度(底栖动物、鱼类生物量);N 为 1 L 水样中全部类群的藻类总细胞密

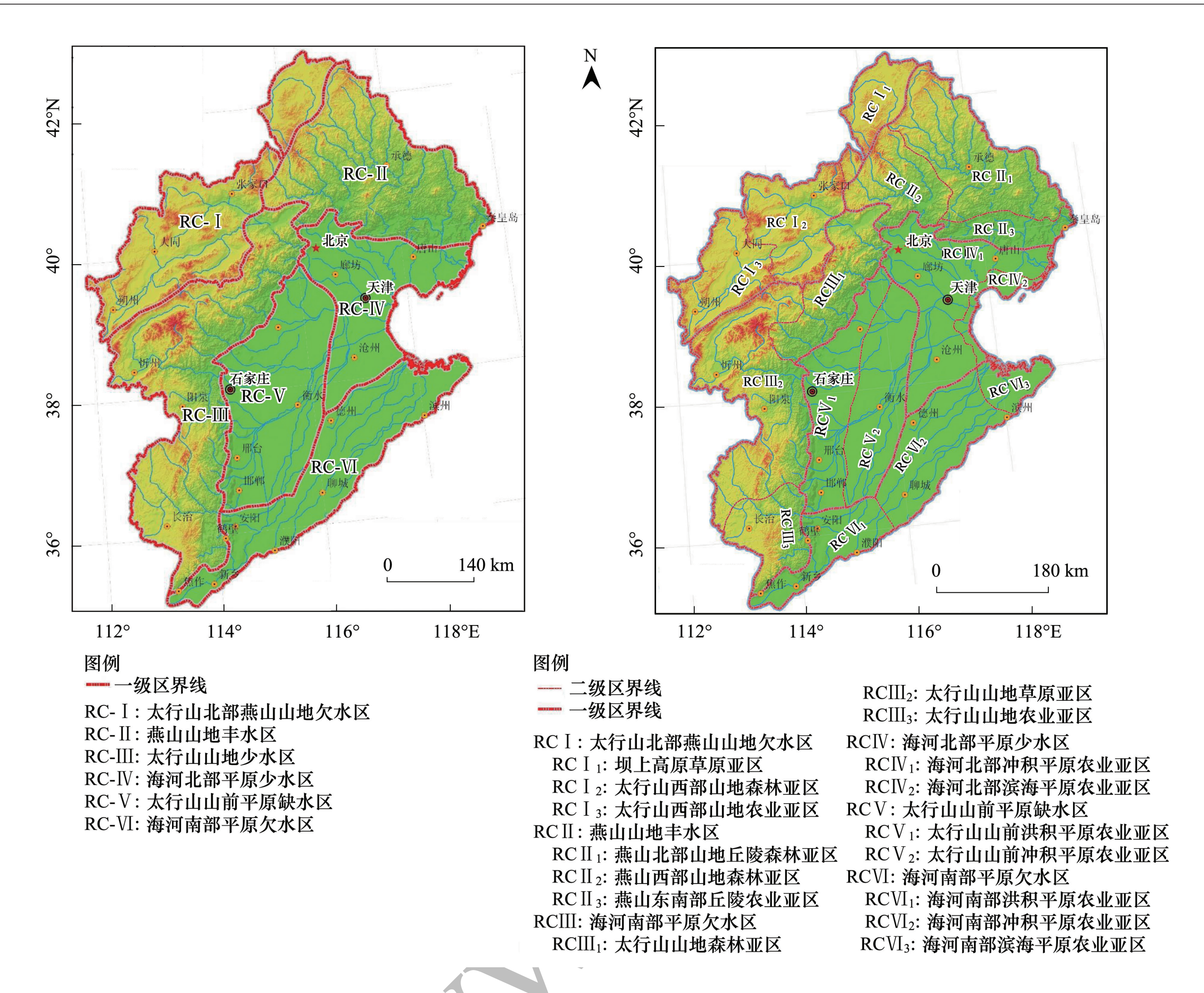


图 1 海河流域水生态功能一级和二级分区

Fig.1 First- and second- level of eco-regions in the Haihe River Basin

度(底栖动物、鱼类总生物量)。

2 分区方法

2.1 分区原则

三级分区目的是揭示陆地生态系统对水生态系统的承载功能和胁迫效应,明确人类活动胁迫背景下的水生态系统类型及组合特征(图 3)。基本原则包括:

(1)陆水耦合原则。陆地生态系统对水生态系统产生直接影响,而通过水生态系统调整陆地生态系统的基本单元和管理方法,从而实现"以水定陆、以陆控水",两者相互影响、相互制约。通过陆地指标对水生态系统形成和维持的区域因子进行分区,但是每个指标需要对水生态系统具有明确的影响。通过陆地生态系统和水生态系统的相互反馈,最终实现较为理想的陆地分区管理和水生态目标。

(2)集水单元完整性原则。三级区最基本的分区单元定为小流域,体现小流域整体的一致性,以及不同小流域之间的差异性。

(3)人类活动胁迫的主导性原则。基于海河流域人类活动强烈,水资源和水环境受到严重胁迫,三级区中人类活动和土地利用的影响尤其需要刻画,人类胁迫背景下的水生态系统类型及组合会产生不同的水生态功能。

(4)河流类型与功能相统一的原则。三级区中要体现河流类型差异,河流上下游和干支流的差异,以及

这些差异可能对水量、水质、河流生境的影响。

2.2　分区指标

三级分区指标需要具有时间上的稳定性、空间上的异质性、生态要素因果关联性等。主要从以下几个方面进行考虑:

(1)水资源胁迫与承载功能:通过文献调研,首先确定了一系列的备选指标,其中生活用水强度(t/km²)、工业用水强度(t/km²)、农业用水强度(t/km²)3个指标是水资源胁迫强度的最直接因素,其它指标更多是间接的影响这3个用水强度指标。水资源的承载功能的备选指标中,小流域面积(km²)和平均汇水强度(km²)是小流域汇水能力的直接度量指标。水库总库容(亿 m³)能够反映人类工程措施对水资源的承载能力,以及对于洪水调蓄、水源涵养等的支持力度。

(2)水环境胁迫与承载功能:生活排水强度(t/km²)、工业排水强度(t/km²)、化肥使用强度(kg/km²),能够从生活、工业、农业3个最主要的方面提供直接的依据。能够刻画水环境承载功能,或者能够维持营养物循环能力的一些指标,包括流域平均坡度、流域形状指数(LSI)、河流比降、河网密度等。根据文献研究,流域平均坡度和流域形状指数能够影响水文条件,如流速、流量等,是能够影响营养物循环的重要因子。坡度与大多数的地形参数具有相关性,但坡度和形状指数是反映垂直和水平两个尺度上的影响因子,两者之间没有关联性,可以同时作为必选指标。

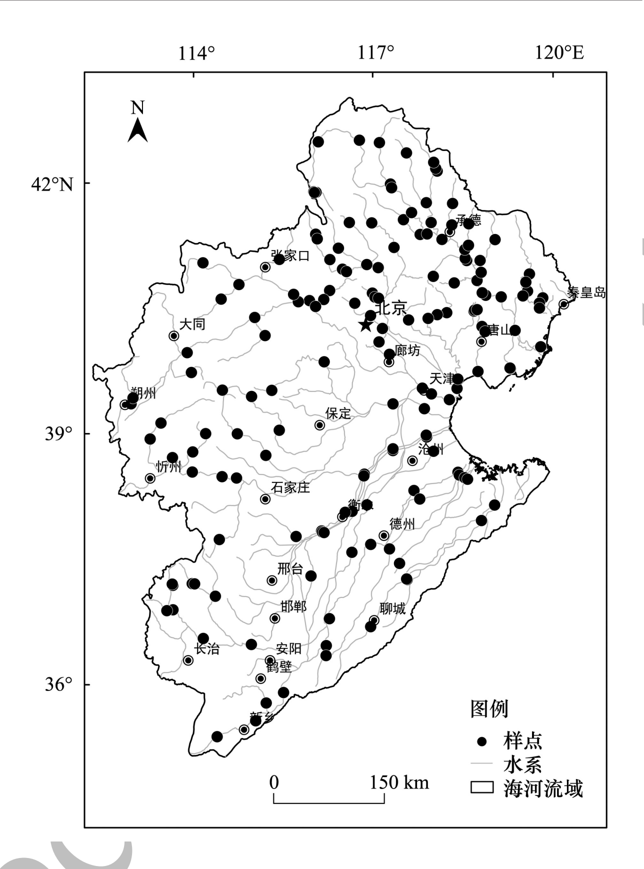


图 2　海河流域河流采样点

Fig.2　Sampling sites in the Haihe River Basin

(3)河流生境胁迫与承载功能:主要体现人类活动的影响,尤其是自然地表与人工地表的比例、湿地比例等。土地利用强度代表人类活动对河流生境的胁迫压力。湿地比例能反映流域内河流生境的承载能力。

(4)河流类型与生态功能的统一性:河流类型通常与特定的生态功能相结合,比如干支流、上下游、源头河流、入海河流,以及通过弯曲度、比降、流速等分类。河流级别是以上各种河流类型划分的代表指标,具有最稳定的特征、最广泛的代表性。不同级别河流为水生生物提供的生境条件不一样,适合于不同的物种分布和群落组成。根据河流级别差异,将水生态功能区进行二次划分,形成河流类型相对一致的水生态功能区。

为了计算简便,将人类活动对水资源、水环境、生境的影响设为相等权重(表1)。

3　结果

3.1　空间格局特征

三级区指标的空间聚类在各个二级区内进行,在 ArcGIS 平台的空间聚类模块下划分了三级区。但是这种划分存在很多的不确定、错误斑块,需要手工的判读和取舍。取舍的原则首先参考 DEM、河网数据,其次要尽量使不同二级区间的三级区保持连续性,最后要在分类详细程度和分类准确程度之间取得平衡。最终,将2957个子流域叠加二级区后划分成3620个斑块,通过聚类分析得到211个三级类型。再根据人工判读,对508个斑块的属性进行了重命名,总体的人工判读率为14%,得到73个三级区(图4)。

3.2　分区结果评价

据2013—2015年调查数据和评价需要,藻类和鱼类鉴定到种,底栖动物鉴定到科。海河流域藻类共计5门、7纲、15目、28科、61属、159种,底栖动物共计3门、7纲、23目、117科、300属,鱼类采集到10目15科43

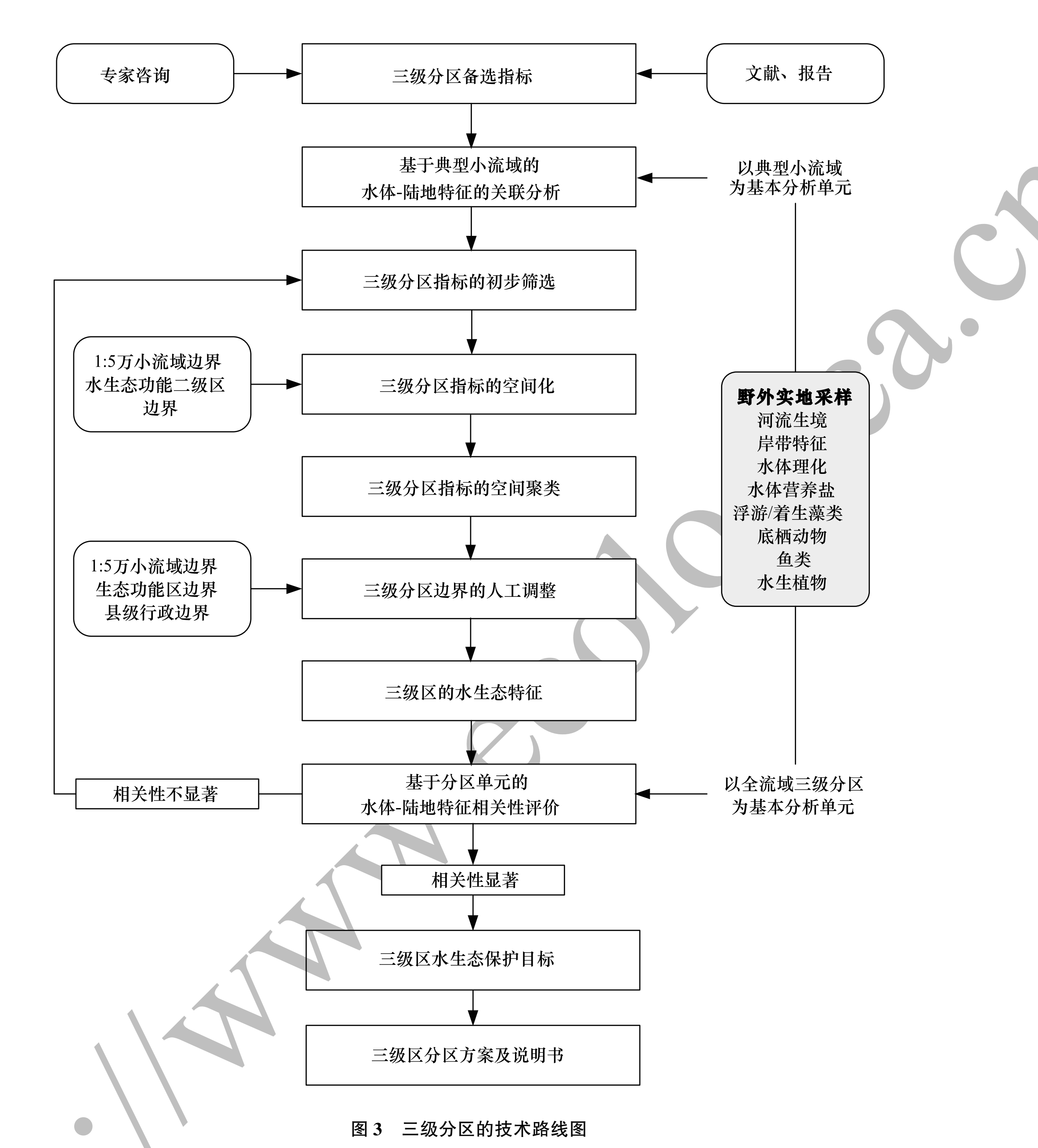


图 3 三级分区的技术路线图

Fig.3 Framework of third-level eco-region regionalization in the Haihe River Basin

属 54 种。为了获取较为稳定的水生生物指标,我们将多次采样数据进行平均,在每个子流域分析水生态系统特征和社会经济特征的相关性。表 2 统计了分区指标与水质、水生生物指标的相关性,从显著性($P<0.05$, $P<0.01$)可以看出多数分区指标能够从不同方面反映水生态系统的异质性。

(1)对水生态健康的影响:小流域面积、林草地比例、小流域坡度、化肥使用强度等影响较为明显;(2)对水环境特征的影响:化肥使用强度、林草地比例、生活用水强度、生活污水强度、小流域面积和坡度等影响较为明显;(3)对藻类的影响:工业污水强度和林草地比例是比较明显的指标;(4)对底栖动物的影响:工业用水强度、工业污水强度、湿地比例、小流域坡度和林草地比例的影响明显;(5)对鱼类的影响:多数分区指标表现出了较为明显的相关性,如农业用水强度、化肥使用强度、工业用水和污水强度、小流域的面积、形状、坡度、林草地比例等。相对地,生活用水和污水强度对鱼类群落影响不明显。

表 1　三级分区指标及权重

Table 1　Indicators and weight of third-level eco-regions

影响类别 Influencing category	胁迫/支持 Stress/Support	分区指标 Eco-region indicator	权重 Weight	其它相关指标 Alternative indicator
人类活动对水资源的影响 Effects of anthropogenic activities on water resources	水量胁迫	生活用水强度/(t/km^2) 工业用水强度/(t/km^2) 农业用水强度/(t/km^2)	1/3 1/3 1/3	人口密度、GDP、农田比例、城镇比例等
	水量承载	小流域面积/(km^2) 水库总库容/(亿 m^3) 平均汇水面积/(km^2)	1/3 1/3 1/3	水库控制面积、河网密度、水闸密度、降水量等
人类活动对水环境的影响 Effects of anthropogenic activities on water environment	水质胁迫	生活排水强度/(t/km^2) 工业排水强度/(t/km^2) 化肥使用强度/(kg/km^2)	1/3 1/3 1/3	产业结构、工业产值、人口密度、农药使用强度、牲畜比例等
	水质承载	流域平均坡度/(°) 流域形状指数	1/2 1/2	河流比降等
人类活动对生境的影响 Effects of anthropogenic activities on habitats	生境胁迫	土地利用强度/%	1	河流挖沙、人工改造等
	生境承载	湿地面积/km^2	1	保护区面积等

4　讨论

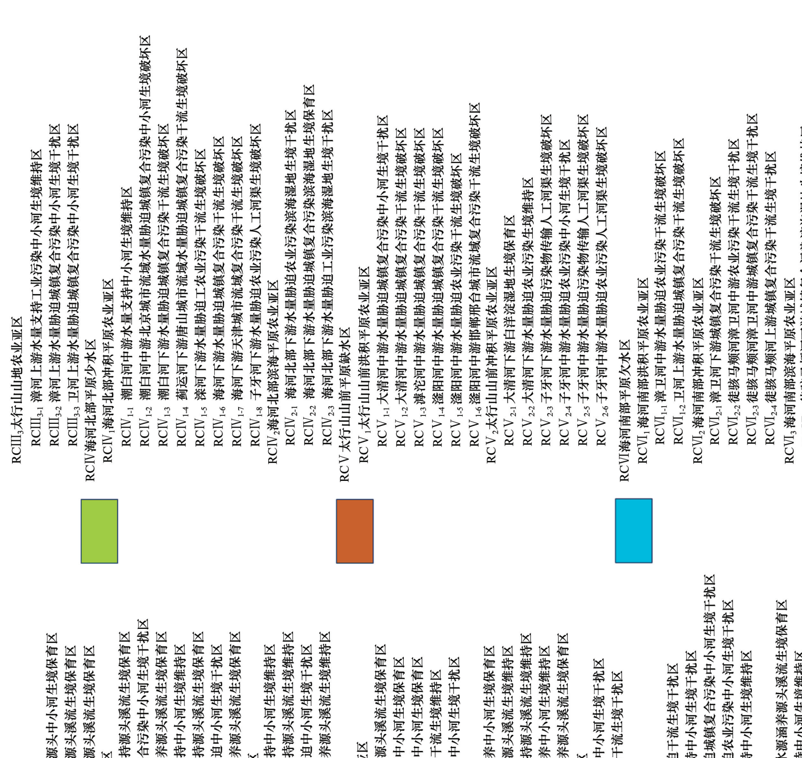
海河流域现有分区方案大致分为以下几类:自然地理区划、生态功能区划、水功能区划、生态水文区划、水资源区划等。通过综合比较海河流域现有分区方案(表 3),水生态功能三级分区在以下几个方面有所改进:

(1)在陆水耦合方面有所加强

自然地理区划考虑了地貌、气候、水文、土壤和植被等环境因素的空间特征;生态功能区划突出了人类活动对生态环境问题的影响;水功能区划以流域为单元进行逐级划分,仅仅是对可见水体的功能划分;生态水文区划强调区域的水文、水资源特征;水资源区划偏重于社会经济指标。现有多数方案仅针对陆地生态系统或者水生态系统,忽略了两者之间的关联性。水生态功能分区是为实现“分级”“分类”“分区”“分期”的管理目标,将综合区划和专题区划有机结合。这种有机结合体现在多级区划上,其中一级、二级区划属于综合区划,综合考虑多种自然环境因素;三级区划属于专题区划,针对具体水生态环境问题进行分区。水生态功能分区需要在不同级别针对性区分主控要素,我们根据流域的地形、水文、气候、植被和土壤等生态特征,划分了水生态功能的一级、二级分区,在此基础上考虑人类活动对水生态系统的胁迫效应,进行水生态功能三级区划分。考虑到管理需要以及指标稳定性,在分区指标的选择中完全以陆地生态系统的指标为主,没有将水生态系统指标纳入分区指标,只是作为分区指标选择、分区结果验证使用。

(2)在管理需求方面增加针对性

海河流域现有分区方案既有综合性区划,又有专题区划。大部分自然地理区划和生态功能区划属于综合区划,综合了多个自然因子或社会经济因子,区划不是针对某一项社会需要。专题区划则是围绕某一环境或社会因素进行分区,例如水功能区划主要围绕水对人类的服务功能进行分区。与水生态相关的一些区划方案都力求打破行政边界的束缚,多以流域边界为区划范围,根据流域的自然属性进行分区。但是,由于中国实行以行政区为基础的管理体系,即使成立一个统筹全流域的职能部门,也必须让各行政区最终实施。要打破这种尴尬的局面,还需要充分融合自然边界和行政界线。现有多数方案在基本分区单元、分区目标等方面脱离了管理部门的实际需求。本研究的水生态功能三级分区综合考虑了流域边界和行政区划,在空间单元上容易管理;根据“以水定陆、以陆控水”的原则,容易据此制定针对性的管理方案。



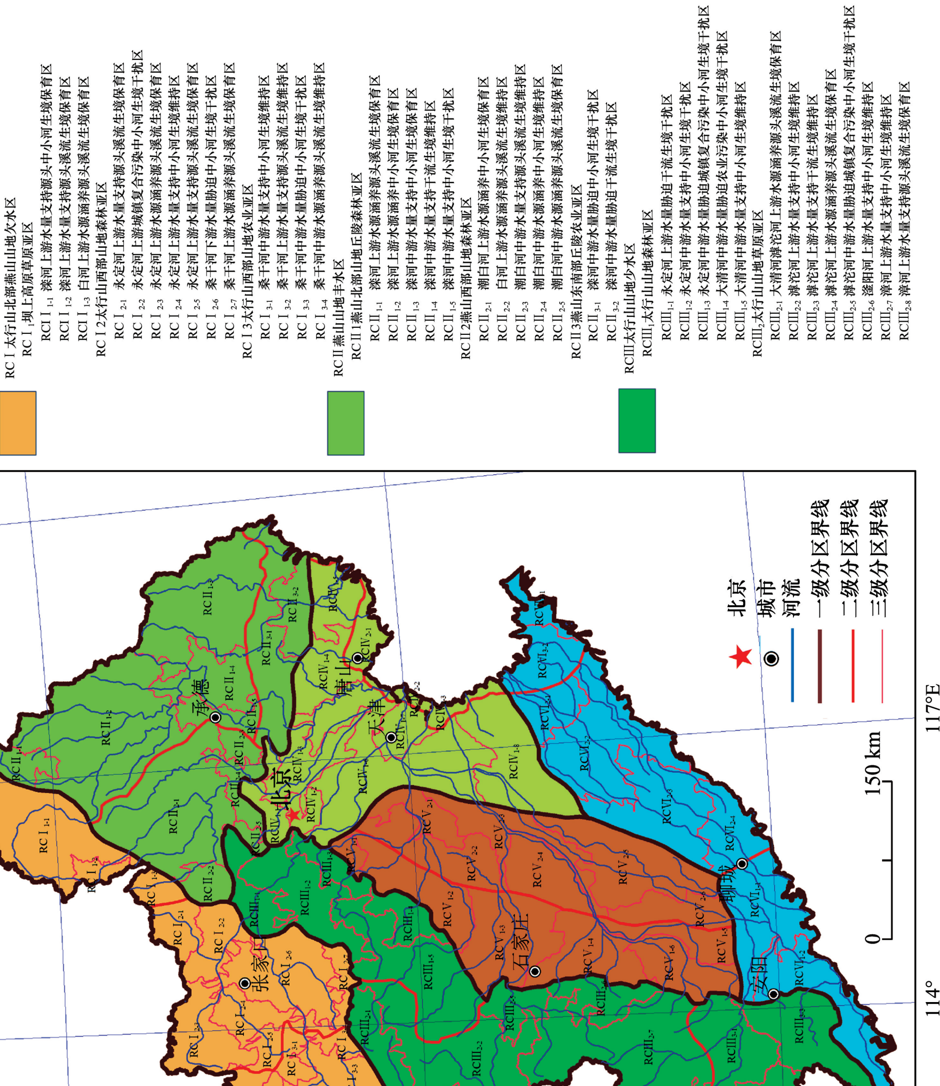




图 4 海河流域水生态功能三级分区

Fig. 4 Third-level eco-regions in the Haihe River basin

表 2　水生态功能分区指标与水生态系统特征的相关显著性

Table 2　Significance of correlation between regionalization indicators and aquatic ecosystem factors

水生态因子 Aquatic factor	指标 Indicator 指标	水资源 Water resource						水环境 Water environment					水生境 Aquatic habitat		
		生活用水强度	农业用水强度	工业用水强度	子流域面积	汇水强度	水库库容	生活污水强度	工业污水强度	化肥使用强度	坡度	子流域形状	林草地比例	湿地比例	河流级别
水环境	pH	**		**				**	**					*	
Water environment	DO									*					
	电导率				*	**			*	*	**	**	**	**	
	叶绿素				*						**	**	**		
	硬度	*		*				*	*					**	
	NH_3-N	**			**	*	*		**		*		*		
	TN	*			*	*		**		**			*		*
	TP	*						*							
	COD		*				*			*	*		*		
藻类 Algae	分类单元数		*	*					**		*	*	*	*	
	B-P 指数								*						
	S-W 指数								*						
底栖动物	分类单元数										*		*		
Macroinvertebrates	B-P 指数	*		**				*	**					**	
	S-W 指数											*			
鱼类 Fish	鱼类种数		*		*					*	*	*	**		
	B-P 指数		*	*	*				*	**	**	**	**		
	S-W 指数		**	*	**	*			**	**	**	*	**		

* $P<0.05$, ** $P<0.01$; DO:溶解氧,Dissolved oxygen; NH_3-N:氨氮,Ammonia nitrogen; TN:总氮,Total nitrogen; TP:总磷,Total phosphorus; COD:化学需氧量,Chemical oxygen demand; B-P:Berger-Parker; S-W:Shannon-Wiener

表 3 海河流域的各种分区方案比较

Table 3 Comparison of different regionalization schemes in the Haihe River Basin

分区性质 Eco-region category	分区名称 Eco-region name	研究者 Researcher	分区特色 Eco-region feature
自然地理区划 Regionalization of physical geography	中国自然区划草案	罗开富[29]	根据季风划分一级区,然后划出过渡区,再依据地形划出副区。按自然特征而划分
	中国综合自然区划	黄秉维[30]	根据热量划分热量带,根据水分划分自然地区,根据干燥度划分干湿地区,再以土壤、植被为依据划分自然地带。区划服务对象是农业
	中国自然区划概要	席承藩[31]	根据地貌和季风划分 3 大区域,再根据温度划分温度带,温度带内再划分区。以地貌和气候为划分指标,未重视土壤和植被条件
	中国自然地理区划	任美锷[32]	主要依据地貌、气候等自然差异进行 3 级区划,同时考虑了人类改造和利用自然的不同方向
	中国自然区划方案	赵济[33]	依据温度条件和水分条件组合进行区划,考虑了人类对自然环境的开发利用方向,区划单元充分照顾了地貌的完整性
生态功能区划 Regionalization of ecological functions	对于中国各自然区的农、林、牧、副、渔业发展方向的意见	侯学煜[34]	按照热量划分气候带和区域,根据大气、水、热的结合状况划分自然区。关注水热状况和区内的耕作制度
	全国生态功能区划	环境保护部,中国科学院[35]	突出了主要生态环境问题和人类活动的影响。主要根据生态系统空间特征,生态敏感性和生态系统服务功能等特征进行划分
水功能区划 Regionalization of water functions	中国水功能区划	水利水电规划设计院[36]	以流域为单元,对水域功能划分,忽视生态系统整体特征
生态水文区划 Regionalization of ecological hydrology	中国河流生态水文分区方案	尹民等[37]	结合生态环境特点与水文水资源状况,应用专家判断与定性分析等方法,将全国划分为 3 个级别的水文区
水资源区划 Regionalization of water resources	海河流域水资源管理分区研究	柳长顺等[38]	指标体系包括环境、粮食、水资源和社会经济 4 大类 30 个指标。根据最小研究单元的聚类分析结果,自下而上合并分区单元

(3)分区方法方面更加综合

从分区方法上看,绝大部分区划都采用了分级、分区的基本方法。在具体分区技术上,大部分区划方案都采用自上而下,逐级划分的分区技术。有少数区划方案采用自下而上,合并小区域单元为大区域单元的分区技术。因此,不同级别分区、不同目标分区尽量采用针对性的分区方法。海河流域水生态功能分区充分吸收了两种分区方法的优点。一级二级区采用"自上而下"的分区方法,主要根据地域分异规律以及水生态系统的异质性分析,按区域内相对一致性和区域共轭性划分出最高级分区单位,逐级向下划分低级的单元,适合于大尺度的宏观格局分区。该方法可以集成已有研究成果和专家经验,体现水生态功能的宏观规律性。三级分区采用"自下而上"的分区方法,主要基于生态系统结构的分类指标,并根据各指标反映的水生态功能信息对其进行筛选,通过空间聚类获得分区结果[39]。

5 结论

海河流域共划分了 6 个一级区、16 个二级区、73 个三级区,充分考虑了陆地自然要素和人类活动的影响,体现了水生态功能管理的"分区"、"分级"、"分类"、"分期"目标。一级二级区基于宏观自然要素的识别,为区域规划与分区管理提供基础生态背景,可以为土地利用规划与调控、水资源空间调配与合理利用等提供科

学支撑。三级区可以应用于中小尺度的环境管理,包括为区域社会经济一体化发展提供科学依据,为基于分区单元的环境污染负荷确定、产业结构布局与区域协调等服务。后续可以据此对河段进行精细化管理,根据区域水生态目标、水生生物保护物种等提出具体的管理措施。

本研究存在进一步改进空间,最终的 73 个分区中,有 4 个分区没有较大的地表水系,分区结果仅是反映了陆地生态系统对于水生态系统的潜在影响。这在具体的水生态管理实践中需要明确潜在影响和现实影响,从而制定更加针对性和科学的管理策略。

参考文献(References):

[1] Zhang Y, Fu G, Yu T, Shen M H, Meng W, Ongley E D. Trans-jurisdictional pollution control options within an integrated water resources management framework in water-scarce north-eastern China. Water Policy, 2011, 13(5): 624-644.

[2] 孟伟, 张远, 张楠, 蔡满堂, 黄艺. 流域水生态功能区概念、特点与实施策略. 环境科学研究, 2013, 26(5): 465-471.

[3] Bailey R G. Ecoregions: The Ecosystem Geography of the Oceans and Continents. New York: Springer-Verlag Inc., 1998.

[4] Abell R A, Olson D M, Dinerstein E, Hurley P T, Diggs J T, Eichbaum W, Walters S, Wettengel W, Allnutt T, Loucks C J, Hedao P. Freshwater Ecoregions of North America: A Conservation Assessment. Washington DC: Island Press, 2000.

[5] Abell R, Thieme M L, Revenga C, Bryer M, Kottelat M, Bogutskaya N, Coad B, Mandrak N, Balderas S C, Bussing W, Stiassny M L J, Skelton P, Allen G R, Unmack P, Naseka A, Ng R, Sindorf N, Robertson J, Armijo E, Higgins J V, Heibel T J, Wikramanayake E, Olson D, López H L, Reis R E, Lundberg J G, Pérez M H S, Petry P. Freshwater ecoregions of the world: a new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation. BioScience, 2008, 58(5): 403-414.

[6] Frissell C A, Liss W J, Warren C E, Hurley M D. A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. Environmental Management, 1986, 10(2): 199-214.

[7] 孟伟, 张远, 郑丙辉. 辽河流域水生态分区研究. 环境科学学报, 2007, 27(6): 911-918.

[8] 张楠, 孟伟, 张远, 郑丙辉. 辽河流域河流生态系 统健康的多指标评价方法. 环境科学研究, 2009, 22(2): 162-170.

[9] 李翔, 张远, 孔维静, 郦威, 卫毅梅, 冯祯. 辽河保护区水生态功能分区研究. 生态科学, 2013, 32(6): 744-751.

[10] 李艳梅, 曾文炉, 周启星. 水生态功能分区的研究进展. 应用生态学报, 2009, 20(12): 3101-3108.

[11] 黄艺, 蔡佳亮, 郑维爽, 周丰, 郭怀成. 流域水生态功能分区以及区划方法的研究进展. 生态学杂志, 2009, 28(3): 542-548.

[12] 高永年, 高俊峰. 太湖流域水生态功能分区. 地理研究, 2010, 29(1): 111-117.

[13] 唐涛, 蔡庆华. 水生态功能分区研究中的基本问题. 生态学报, 2010, 30(22): 6255-6263.

[14] 王传辉, 吴立, 王心源, 王官勇, 孙叶根, 胡降临. 基于遥感和 GIS 的巢湖流域生态功能分区研究. 生态学报, 2013, 33(18): 5808-5817.

[15] 江源, 廖剑宇, 刘全儒, 康慕谊. 东江河流生态健康评价研究. 北京: 科学出版社, 2015.

[16] 刘星才, 徐宗学, 徐琛. 水生态一、二级分区技术框架. 生态学报, 2010, 30(17): 4804-4814.

[17] 高喆, 曹晓峰, 黄艺, 李发荣. 滇池流域水生态功能一二级分区研究. 湖泊科学, 2015, 27(1): 175-182.

[18] 蒋艳, 曾肇京, 张建永. 基于基尼系数的中国水生态分区研究. 生态学报, 2015, 35(7): 2177-2183.

[19] 高永年, 高俊峰, 陈坰烽, 许妍, 赵家虎. 太湖流域水生态功能三级分区. 地理研究, 2012, 31(11): 1941-1951.

[20] 万峻, 张远, 孔维静, 张楠, 孟伟. 流域水生态功能Ⅲ级区划分技术. 环境科学研究, 2013, 26(5): 480-486.

[21] 樊灏, 黄艺, 曹晓峰, 高喆, 蒋大林. 基于水生态系统结构特征的滇池流域水生态功能三级分区. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1447-1456.

[22] 高俊刚, 吴雪, 张镱锂, 刘林山, 王兆锋, 姚治君. 基于等级层次分析法的金沙江下游地区生态功能分区. 生态学报, 2016, 36(1): 134-147.

[23] 孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶. 海河流域水生态功能一级二级分区. 环境科学, 2013, 34(2): 509-516.

[24] 陈利顶, 孙然好, 汲玉河. 海河流域水生态功能分区研究. 北京: 科学出版社, 2013.

[25] Zhang H P, Chen L D. Using the ecological risk index based on combined watershed and administrative boundaries to assess human disturbances on river ecosystems. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2014, 20(6): 1590-1607.

[26] 方精云, 沈泽昊, 唐志尧, 王志恒. "中国山地植物物种多样性调查计划"及若干技术规范. 生物多样性, 2004, 12(1): 5-9.

[27] Berger W H, Parker F L. Diversity of planktonic foraminifera in deep-sea sediments. Science, 1970, 168(3937): 1345-1347.

[28] Magurran A E. Ecological Diversity and its Measurement. New Jersey: Princeton University Press, 1988.

[29] 罗开富. 中国自然地理区划草案. 北京: 科学出版社, 1956.

[30] 黄秉维. 中国综合自然区划的初步草案. 地理学报, 1958, 24(4): 348-365.

[31] 席承藩, 张俊民, 丘宝剑. 中国自然区划概要. 北京: 科学出版社, 1984.

[32] 任美锷, 杨纫章, 包浩生. 中国自然地理纲要. 北京: 商务印书馆, 1985.

[33] 赵济, 陈永文, 韩渊丰, 李祯, 刘炎昭, 李文. 中国自然地理(第三版). 北京: 高等教育出版社, 1995.

[34] 侯学煜, 姜恕, 陈昌笃, 胡式之. 对于中国各自然区的农、林、牧、副、渔业发展方向的意见. 科学通报, 1963, 8(9): 8-26.

[35] 环境保护部, 中国科学院. 全国生态功能区划. 北京: 环境保护部, 中国科学院, 2008.

[36] 水利部水利水电规划设计总院. 中国水功能区划. 北京: 水利部水利水电规划设计总院, 2002.

[37] 尹民, 杨志峰, 崔保山. 中国河流生态水文分区初探. 环境科学学报, 2005, 25(4): 423-428.

[38] 柳长顺, 刘昌明, 杨红. 海河流域水资源管理分区研究. 地理学报, 2004, 59(3): 349-356.

[39] Chassot E, Mélin F, Le Pape O, Gascuel D. Bottom-up control regulates fisheries production at the scale of eco-regions in European seas. Marine Ecology Progress Series, 2007, 343: 45-55.